Sondenmessungen über Anoden- und Kathodenfall im Metallichtbogen.

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
vorgelegt der Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

EDMOND BANDERET
aus Frésens (Neuenburg).

Mit 11 Figuren.

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser
1912.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546706_0105

Sondenmessungen über Anoden- und Kathodenfall im Metallichtbogen.

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
vorgelegt der Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

EDMOND BANDERET
aus Frésens (Neuenburg).

Mit 11 Figuren.

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser
1912.

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren Dr. *A. Hagenbach* und Dr. *K. Vonder Mühll.*

Basel, den 14. Februar 1912.

Rud. Fueter, Dekan.

MEINEN LIEBEN ELTERN
AUS DANKBARKEIT GEWIDMET.

Einleitung.

Vor einiger Zeit haben die Herren Professoren *Aug. Hagenbach* und *H. Veillon*[1]) ihre Untersuchungen über den elektrischen Lichtbogen zwischen Kupferelektroden veröffentlicht. Sie zeigen, dass im partiellen Vakuum der Kupferbogen in sieben verschiedenen Formen auftreten kann. Auf Herrn Professor *Hagenbachs* Anregung hin unternahm ich es, für die verschiedenen Formen Anoden- und Kathodenfall zu messen und zu vergleichen, um die Bogenformen nach dieser Seite experimentell zu prüfen.[2]) Ich benützte im Wesentlichen die Methode von *Child*.[3]) Bevor ich jedoch zur Beschreibung derselben übergehe, wird es angebracht sein, über die Theorie des Lichtbogens, soweit sie in dieser Arbeit berührt wird, und über die einschlägige Literatur einige Angaben zu machen. Die Monographien über den Lichtbogen von Mrs. *Hertha Ayrton*,[4]) *J. Stark*,[5]) *W.B. von Czudnochowski*,[6]) *J. J. Thomson*,[7]) *B. Monasch*[8]) und *C. D. Child*[9]) lassen es unnötig erscheinen, die Literatur über das ganze Gebiet anzuführen.

Nach der ionentheoretischen Anschauung haben wir es im Bogen mit einer selbständigen Strömung zu tun.[10]) Notwendige und hinreichende Bedingung ist hohe Temperatur in der kathodischen Ansatzstelle des Bogens. Infolge der hohen Temperatur sendet diese in den

---

[1]) *A. Hagenbach* und *H. Veillon*. Verh. der Nat. Ges. Basel 21, 1910. S. 64.
[2]) l. c. S. 81.
[3]) *C. D. Child*. The electric arc. Phys. Rev. 19, 1904. S. 117.
[4]) *H. Ayrton*. The electric arc. London 1902.
[5]) *J. Stark*. Die Elektrizität in Gasen. Leipzig 1902.
[6]) *W. B. Czudnochowski*. Das elektrische Bogenlicht. Leipzig 1906.
[7]) *J. J. Thomson*. Elektrizitätsdurchgang in Gasen. Leipzig 1906.
[8]) *B. Monasch*. Der elektrische Lichtbogen. Berlin 1904.
[9]) *C. D. Child*. Jahrbuch der Rad. und El. 3, 1906. S. 189.
[10]) *J. Stark*. Ann. d. Phys. 12, 1903. S. 687. *H. Th. Simon*. Phys. Ztschr. 6, 1905. S. 297.

angrenzenden Dampfraum negative Elektronionen, welche ihrerseits wieder durch Stoss direkt oder durch die erzeugte Wärme das Gas und den Dampf im Zwischenraum oder die Anodenoberfläche ionisieren. So werden positive Ionen erzeugt, welche die Kathode bombardieren und ihr die nötige Wärme zuführen. Es ist ersichtlich, dass auf diese Weise ein stationärer Zustand sich einstellt, der sich selbst zu erhalten imstande ist. Wollte der Strom nachlassen, so würde vor der negativen Elektrode die Zahl der Elektronen abnehmen, die Spannungsdifferenz würde wachsen und die positiven Ionen würden mit grösserer Gewalt auf die Kathode stürzen. So wird die Kathode vom Strom selbst auf der Verdampfungstemperatur erhalten. Bekanntlich tritt an der Kathode und an der Anode ein Sprung des Potentials ein, für welchen verschiedene Erklärungen auf Grund dieser Theorie gegeben wurden. Für den Kathodenfall liegt eine Ursache zunächst darin, dass in ihrer Umgebung positive Ionen sich anhäufen, die ihre Ladung noch nicht abgegeben haben. Die Grösse dieser Anhäufung ist durch die Gleichgewichtsbedingungen des Entladungsvorganges bestimmt. Der Anodenfall ist dagegen eine Folge davon, dass aus der stark erhitzten Oberfläche auch negative Elektronionen austreten, welche dem Strom entgegenwirken, so dass eine Abkühlung derselben eine Verminderung des Anodenfalles zur Folge hat. Dass aber die Anode auf den Entladungsvorgang nicht ganz ohne Einfluss ist, und zum wenigsten auf die Form des Bogens einwirkt, wird auch aus dieser Arbeit ersichtlich.

Formen des Bogens.

Es ist eine schon lange bekannte Tatsache, dass der Kohlebogen in zwei verschiedenen Stadien brennen kann, in einer normalen, geräuschlosen und einer unruhigen zischenden Form. Neben dieser letzteren, die auf einem Oxydationsprozess zu beruhen scheint,[11]) sind am Kohlebogen noch eine Reihe von andern Formen beobachtet: drei verschiedene von *Hoerburger*[12]) im Kohlebogen unter vermindertem Druck, und eine Form, die an der Anode Glimmstrom hat, von *Malcolm*[13]) für Kohle im Wasserstoff.

Viel deutlicher lassen sich bei Metallbogen verschiedene Formen nachweisen. Schon *Lehmann*[14]) hat am Kupferbogen deren zwei unterschieden. Weitere hier zu erwähnende Angaben macht *Arons*,[15]) der bei Kupfer, Eisen und Magnesium zwei Bogen von verschiedenem

[11]) Mrs. *H. Ayrton*. l. c. S. 299—308.
[12]) *A. Hoerburger*. Diss. Greifswald. 1905.
[13]) *H. W. Malcolm*. Phys Ztschr. 8, 1907. S. 471.
[14]) *O. Lehmann*. Ann. d. Phys. 55. 1895. S. 361.
[15]) *L. Arons*. Ann. d. Phys. 1, 1900 S. 700.

Aussehen beschreibt, ohne indessen darüber genaue Zahlenangaben machen zu können. Auch *Child*[16]) hat zwischen Graphitelektroden im Wasserstoff drei Bogenformen gefunden, die freilich den Erscheinungen in Geisslerschen Röhren ähnlicher waren als dem Bogen. Systematische Untersuchungen sind zuerst von *Cady* und *Arnold*[17]) angestellt worden. Sie benützten dazu den Eisen- und Kupferbogen und haben offenbar die Formen beobachtet, welche *Hagenbach* und *Veillon* mit 1 und 3 bezeichnen. Es sind dies der gewöhnliche Bogen (bei Eisen vielleicht die häufigere Zischform) und der Glimmbogen, der an der Anode in einem breiten Glimmlicht ohne die Farbe des Metalldampfes ansetzt. Aus einer kurzen Notiz dieser Autoren kann man schliessen, dass sie auch die Form 2 gesehen haben, ohne sie jedoch besonders zu beachten. Das gleiche gilt für die Untersuchungen von *Fabry* und *Buisson*,[18]) welche die Bogen 1 und 3 auch spektroskopisch analysiert haben und Volt-Druck-Kurven für diese Formen aufstellen. Auch für eine Reihe anderer Metalle als Elektroden ist das Vorkommen des normalen Bogens und des Glimmbogens angegeben worden: ausser bei Kupfer und Eisen noch bei Pt *(Cady* und *Arnold)*, bei Mg und Hg *(Arons)*. Auch die Zischformen des Metallbogens sind gelegentlich erwähnt, d. h. Formen, bei welchen die gelbe Aureole sich plötzlich ausserordentlich verstärkt und die Spannung zwischen den Elektroden sinkt.[19]). *Hagenbach* und *Veillon*[20]) haben nun den Bogen zwischen Kupferelektroden einem genaueren Studium unterworfen und dabei sechs Formen bestimmt beobachtet und eine siebente angedeutet gefunden. Ausser dem Glimmbogen (Form 1) und dem normalen Bogen (Form 3) tritt noch eine dritte Form (Form 2) auf, welche sich sowohl durch ihr Aussehen als durch die elektrischen Verhältnisse von den andern unterscheidet. Diesen dreien entsprechen drei Zischformen, welche durch die von der Kathode ausgehende Oxydaureole charakterisiert sind (Formen 1 a, 2 a, 3 a).

Beschreibung der Formen.

Zur Erleichterung des Verständnisses füge ich in Fig. 1 eine rein schematische Darstellung der Formen des Cu-Bogens bei (nach *Hagenbach* und *Veillon* l. c.). Die Formen des Eisenbogens haben das gleiche Aussehen; nur ist die Farbe des Metalldampfes bläulich.

Form 1, der Glimmbogen, hat eine punktförmige, kathodische Strombasis von der Farbe des Metalldampfes. Diese Farbe erstreckt

16) *C. D. Child.* Phys. Rev. 20, 1905. S. 100.
17) *W. G. Cady* und *H. D. Arnold.* Phys. Ztschr. 8, 1907. S. 890.
18) *Ch. Fabry* et *H. Buisson.* Journal de phys. (4). 9, 1910 S. 929.
19) *W. Upson.* Phil. Mag. 14 (6) 1907. S. 126.
20) l. c. s. auch. *A. Hagenbach.* Phys. Ztschr. 12, 1911. S. 1015.

sich nur auf einen Teil des Bogens, dessen Länge von Druck und Stromstärke abhängt. Der übrige Teil zeigt die violette Farbe der Glimmentladung in Luft; die Anode ist mehr oder weniger von einer Glimmschicht überzogen. Bogen 1 a ist viel breiter und hat die rotgelbe Farbe der Aureole, die an der Kathode ansetzt und nur bei längeren Bogen nicht die ganze Länge des Bogens bedeckt.

Form 2 unterscheidet sich von 1 durch das Aussehen an der Anode. Dort bildet sich eine rötlich-violette Kugel (Kupfer) oder Spitze (Eisen), von welcher aus der Bogen in Luft in der Farbe des Metalldampfes, in Stickstoff bis fast an die Kathode in der Farbe des „Stickstofflichtes" ausgeht. Bei Form 2 a löst sich von der Kathode ein rotgelber Dampfstrahl los, der je nach der Stromstärke sich mehr oder weniger nahe an die Anode erstreckt.

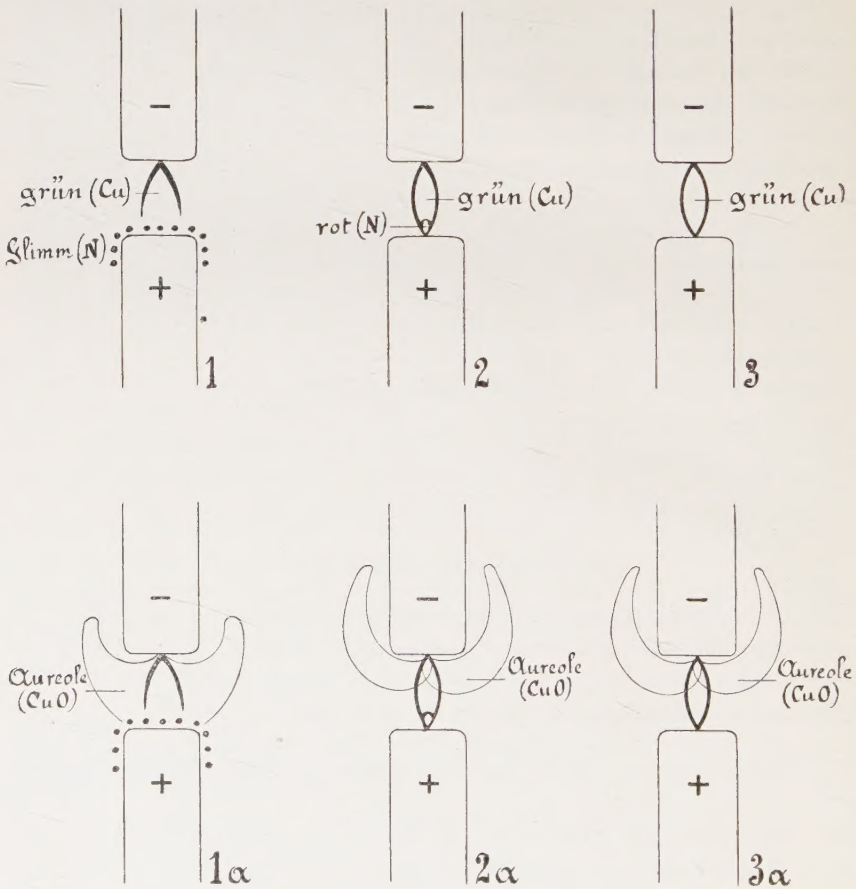

Fig. 1.

Mit Form 3 ist der gewöhnliche Bogen bezeichnet, der an Anode und Kathode punktförmig in der Farbe des Metalldampfes ansetzt. Form 3 a verhält sich zu 3 wie 2 a zu 2.

Es kann aber auch[21]) an der Anode Oxyd frei werden, so dass Form 3 in einem dritten Stadium möglich ist, bei welchem von der Anode und Kathode aus die Aureole sich bildet (Fig. 2).

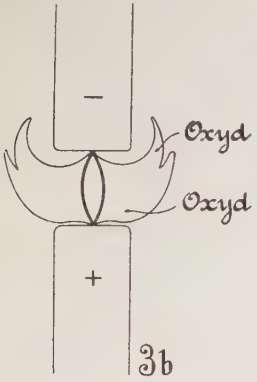

Fig. 2.

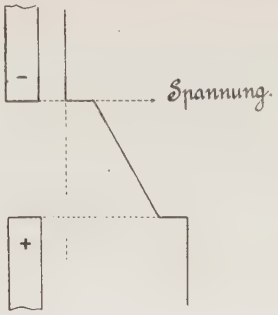

Fig. 3.

Ich habe diese Form am Eisenbogen besonders deutlich und verhältnismässig stationär erhalten, bei Kupfer nie mit Sicherheit. Sie ist mit 3 b bezeichnet worden.

Während die Formen 1 und 1 a sehr ruhig und stabil brennen, sind 2 in Luft und 3 in Luft und Stickstoff sehr unruhig, und dies um so mehr, je weniger der Druck vermindert wird.

Nun haben *Hagenbach* und *Veillon* die Vermutung ausgesprochen, es müssten sechs Kombinationen von drei Anodenfällen und zwei Kathodenfällen möglich sein; es müssen also zwischen 1, 2, 3 Unterschiede im Anodenfall bestehen, während das Übergehen in die a-Formen eine Änderung des Kathodenfalles zur Folge hat. Um diese Ansicht an Hand von Zahlen zu beweisen, sind die vorliegenden Messungen angestellt worden.

Sondenmessungen im Innern des Lichtbogens.

Sondenmessungen sind im Bogen schon häufig angestellt worden. Schon im Jahre 1887 hat *Lecher*[22]) versucht, mit Kohlensonden Kathoden- und Anodenfall für Bogen mit verschiedenen Elektroden

[21]) *Hagenbach* und *Veillon*. l. c. S. 83.
[22]) *E. Lecher*. Wien. Ber. 95 II, 1887. S. 992

zu bestimmen. Er fand bei Metallen für beide Grössen annähernd gleiche Werte, im Kohlebogen dagegen einen viel grösseren Anodenfall. Während *Lecher* die Kohlensonde über ein Voltmeter mit Kathode oder Anode verband, benützte *Luggin*[23]) eine elektrolytische Brückenschaltung, mit deren verschiebbarem Kontakt die Sonde über einen Multiplikator zu verbinden ist. Aus diesen Untersuchungen ergibt sich für die Verteilung des Spannungsgefälles allgemein folgendes Schema (Fig. 3): An den beiden Elektroden findet ein sehr rascher, fast sprungartiger Abfall des Potentials statt, der „Fall" oder das „Hindernis" der betreffenden Elektrode, während in der Gassäule ein gleichmässiges Gefälle besteht. Eingehend hat Mrs. *Ayrton*[24]) den Spannungsabfall im Kohlebogen mit Hilfe von Kohlensonden untersucht. Sie findet eine Abnahme von Kathoden- und Anodenfall mit wachsender Stromstärke und eine Zunahme des Anodenfalls mit wachsender Bogenlänge; der Kathodenfall ist von der Bogenlänge unabhängig. Im Quecksilberlichtbogen fand *Pollack*[25]) mit Hilfe einer Platinsonde eine ähnliche Potentialverteilung wie im Bogen zwischen festen Elektroden. Das Innere des Metallbogens hat wohl *C. D. Child*[26]) am eingehendsten untersucht. Er benützte dazu auch Kohlensonden, bei sehr kleinem Druck des umgebenden Gases Platinsonden und ein Voltmeter von 5000 Ohm Widerstand. Versuche mit einem Elektrometer statt des Voltmeters zeigten einen nur kleinen Unterschied; das Voltmeter war wegen der schnelleren Einstellung und bequemeren Handhabung vorzuziehen. Ich führe hier seine Resultate für den Kupferbogen an (offenbar Form 3), weil sie für die vorliegende Arbeit von Wichtigkeit sind. Leider habe ich bei der ersten Messung (Bd. 12) keine Angabe der Bogenlänge, bei der zweiten (Bd. 19) der Stromstärke finden können.

Stromstärke	Bogenlänge	Druck in mm Hg.	Kathodenfall	Anodenfall.
6 Amp.	—	760	14 Volt	11 Volt
—	2 mm	30	12 „	20 „
—	„	10	11 „	20 „
—	„	4	11 „	18 „
—	„	2	10 „	20 „

Für den Eisenbogen findet *Child* ähnliche Werte. Bei Atmosphärendruck und 6 Ampère beträgt (s. Bd. 12) der Kathodenfall 15 Volt, der Anodenfall 13 Volt. Während die bisherigen Forscher

[23]) *H. Luggin.* Wien. Ber. 95 II, 1887. S. 759; 98 II$_a$, 1889. S. 1192.
[24]) l. c. S. 207 ff.
[25]) *J. Pollack.* Ann. d. Phys. 19, 1906. S. 217.
[26]) *C. D. Child.* Phys. Rev. 12, 1901. S. 149; 19, 1904. S. 117; 20, 1905. S. 364.

möglichst dünne Sonden benützten, untersuchten *Cady* und *Arnold*[27]) den Eisenbogen mit einem 10 mm dicken Eisenstab.

Child[28]) hat dann die Messungen mit Sonden einer genaueren Kritik unterworfen und gezeigt, dass diese Messungen einen prinzipiellen Fehler haben, der darin besteht, dass erhitzte Körper Ionen aussenden. Nach Versuchen, die er angestellt hat, gibt ein Kohlenstift bei Rotglut positive Ionen ab, bei weiterer Erhitzung positive und negative Ionen gleichmässig, und bei Weissglut endlich gehen hauptsächlich negative Ionen vom Stift aus.

Ich habe trotzdem Sonden benützt; denn es handelt sich in dieser Arbeit um relative Messungen, wobei sich ein grosser Teil des von *Child* bestimmten Fehlers eliminiert.

Apparate und Methode.

Der Bogen brannte in einem gusseisernen Rohr (Fig. 4 und 5 A) von 12 cm innerem Durchmesser und 6 mm Wandstärke. Es war ein Kreuzrohr, wie sie bei Gasleitungen benützt werden. Seine Höhe betrug 53 cm und der Abstand der Seitenöffnungen 37 cm. Die vier Ränder der Öffnungen wurden eben abgedreht und mit gusseisernen Platten verschlossen. Diese konnten unter Zwischenschaltung eines Gummiringes durch Schrauben angepresst werden. Für die obere wurden die Schrauben bei den Messungen in Luft nur bei den höheren Drucken benützt (über 100 mm Hg). Bei tieferen Drucken war das Gewicht der Atmosphäre genügend, um die Platte luftdicht aufsitzen zu lassen. Auf der unteren Platte befand sich der Elektrodenhalter (p, Fig. 4) für die Anode. Der Strom wurde ihm von aussen durch die Platte selbst zugeführt. Der obere Elektrodenhalter (n) war beweglich in vertikaler Richtung, um den Bogen zu zünden und ihm während des Brennens die gewünschte Länge geben zu können. Dies wurde dadurch erreicht, dass ein Eisenstäbchen von 5 mm Dicke mittelst einer Stopfbüchse (a) durch die obere Platte geführt wurde. Mittelst eines Hebels konnte das Stäbchen rasch bewegt werden. An dieses wurde der Elektrodenhalter befestigt, der durch das Zwischenstück b, einen Marmorzylinder von $3^1/_2$ cm Länge, von der oberen Platte isoliert war. Eine isolierte Leitung führte den Strom durch die obere Platte hindurch zum Steckkontakt c. Eine Seitenplatte war mit einem runden Fenster (f) versehen, in das eine Glasplatte (von 6 cm Durchmesser und 5 mm Dicke) mit Gummidichtung festgeschraubt war. Von der gleichen Platte führte ein Vakuumschlauch zum Barometer und über einen Hahnen und eine Chlorkalziumröhre

[27]) l. c.

[28]) *C. D. Child.* Phys. Rev. 24, 1907. S. 498.

ins Freie, so dass durch diese Öffnung Luft eingelassen werden konnte. In die Mitte der gegenüberliegenden Platte war ein Glasrohr (d) eingekittet von 9,6 mm innerer Weite, durch welches der Träger der Sonde, ein Eisenstab von 3 mm Dicke, eingeführt wurde. Eine doppelte Lage von Druckschlauch sicherte die gute Dichtung und ermöglichte zugleich eine grosse Beweglichkeit. So konnte die Sonde leicht an

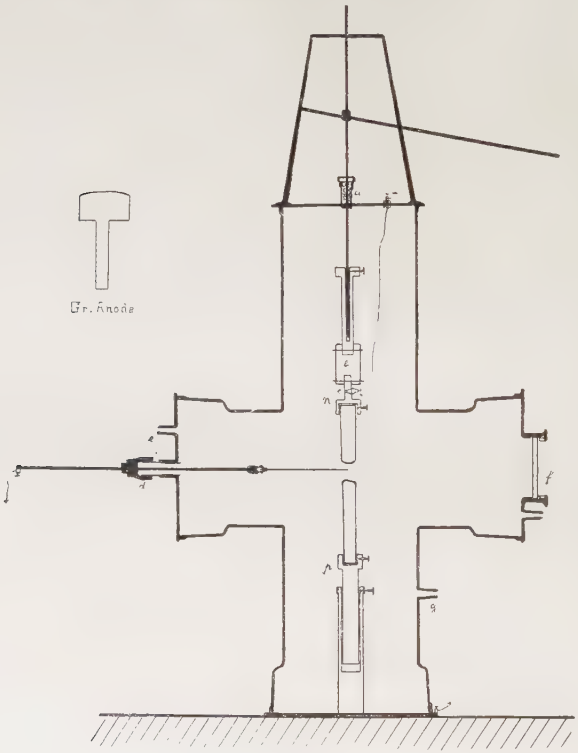

Fig. 1.

alle Punkte des Bogens gebracht werden, beim Abbrennen nachgeschoben und ziemlich schnell ausgewechselt werden. Ein Zuleitungsröhrchen (e) führte zur Wasserstrahlpumpe, ebenfalls unter Zwischenschaltung eines Hahnes und eines Chlorkalziumrohres. An das Rohr g endlich war entweder eine Kapillare oder die Stickstoffzuführung angebracht. Die benützten Kupferelektroden bestanden aus käuflichem Kupfer und zeigten spektroskopisch geringe Verunreinigungen von Blei und Silber.[29]) Als Kathoden dienten stets runde Stäbe von

[29]) *Hagenbach* und *Veillon*. l. c. S. 68.

10—9,2 mm Durchmesser; die Anode hatte in einigen Messungen die gleiche Form. Günstiger erwiesen sich aber Anoden mit grosser Oberfläche (Fig. 4) von folgender Beschaffenheit: ein Kupferzylinder von 47,3—47,1 mm Durchmesser und 27 mm grösster Höhe, der auf einen Eisenstab von 12 mm Dicke aufgeschraubt war. Der Eisenbogen wurde erzeugt zwischen 10 mm dicken, runden Stäben aus gewöhnlichem Eisen. Die Sonden waren dünne Kohlenstäbe von 1,1 mm Durchmesser und stammten von *J. A. Berne*, Montreuil s. Bois

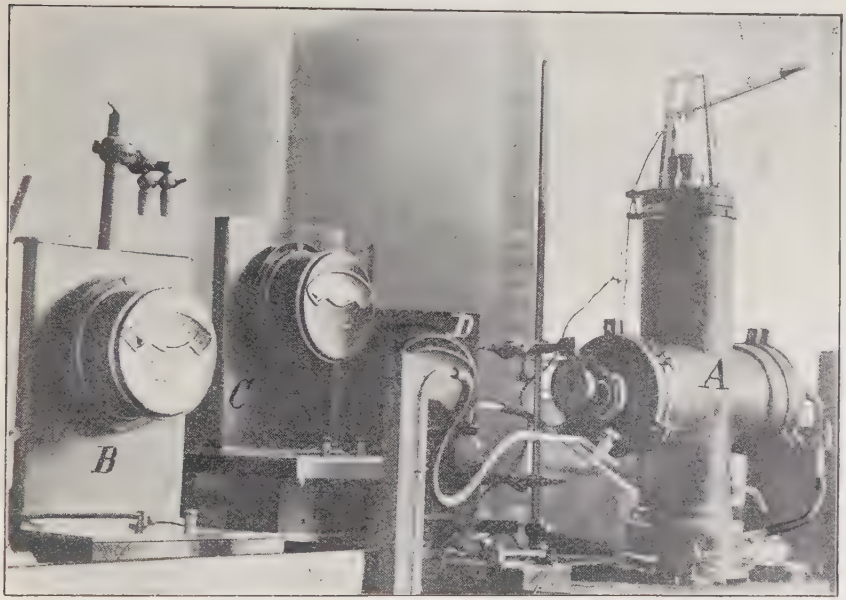

Fig. 5.

bei Paris. Sie wurden vor der Benützung einige Tage in Kalilauge, dann in Schwefelsäure gereinigt und endlich in destilliertem Wasser gewaschen. Sie bewirkten beim Ausglühen in der Bunsenflamme keinerlei Färbung mehr.

Zum Evakuieren des Rohres wurde eine schnell arbeitende Wasserstrahlpumpe benützt, mit der ein Druck von 15 mm erreicht werden konnte; sie genügte also vollkommen für meine Zwecke, da keine Drucke unter 40 mm nötig waren.

Als Messinstrumente dienten folgende Apparate: Ein Voltmeter (Fig. 5 B) vom Land- und Seekabelwerk Nippes-Köln (Messbereich 75 Volt und Widerstand 3540 Ohm) war zwischen Sonde und Elek-

troden über eine Wippe so eingeschaltet, dass die Sonde mit der einen oder andern Elektrode verbunden werden konnte. Die Elektrodenspannung wurde mit einem Voltmeter (C) von derselben Firma gemessen (Messbereich 500 Volt, Widerstand 20,000 Ohm). Das Ampèremeter (D) war ein Drehspulen-Instrument von der Firma Klingelfuss & Cie., Basel. Der Strom wurde am städtischen Gleichstromnetz abgenommen, das eine Spannung von 220 Volt besitzt. Der Bogen wurde durch eine Linse auf einen Schirm projiziert, auf welchem mittelst einer Skala die Länge des Bogens direkt abgelesen werden konnte.

Schirm und Voltmeter B wurden so neben einander aufgestellt, dass diese zwei Ablesungen durch einen Blick aufgenommen werden konnten. Ebenso ermöglichte die Aufstellung des Voltmeters C, des Ampèremeters D und des Quecksilbermanometers fast gleichzeitiges Ablesen dieser Grössen mit der Bogenform. Gerade bei schnell wechselnden und nur kurz andauernden Formen erwies sich eine Teilung des Ablesens unter 2 Beobachter als ungünstig. Nach einiger Zeit hatte ich es so weit gebracht, dass ich Schirm und Voltmeter zugleich schneller überschaute, als wenn ich nur den Schirm und ein zweiter auf mein Kommando Voltmeter B ablas. Die Stromstärke wurde vor der Messung auf die gewünschte Grösse durch Regulierung eines Flüssigkeitswiderstandes gebracht, auch der Druck wurde vorher reguliert. Geringe Änderungen im Druck hatten dabei keinen merkbaren Einfluss, auf solche der Stromstärke musste genau geachtet werden.

Ich habe zuerst versucht, den Potentialunterschied zwischen Sonde und Elektroden auf andere Weise zu messen. Theoretisch besser ist ein Elektrometer; allein, wie schon *Child* ausführt, sowohl ein Dolezalekelektrometer als ein gewöhnliches Thomsonsches Quadrantenelektrometer stellten sich nicht rasch genug ein. Auch die *Lugginsche* Brückenmethode hatte keinen besseren Erfolg. Auch verschiedene Sonden habe ich ausprobiert. Dickere Kohlensonden brachten im Bogen auch entsprechend stärkere Störungen hervor. Metallsonden schmolzen sehr rasch. Um indessen über die Störungen des Bogens durch Bestandteile der Sonde eine Vorstellung zu haben, wurde bei niedrigem Druck ein Versuch im Kupferbogen mit einer Platinsonde von 0,5 mm und im Eisenbogen mit einem Eisendraht von 1 mm gemacht. Beide Versuche gaben das gleiche Resultat wie die dünne Kohlensonde.

An Hand eines Beispieles lässt sich am einfachsten die Methode der Untersuchung darstellen. Um die Kurven II (Kupferbogen in Luft) für die Formen 1, 2 und 3 des Kupferbogens in Luft zu erhalten, müssen zuerst die günstigsten Verhältnisse (Druck, Stromstärke, Bogenlänge) aufgesucht werden, unter denen alle drei Formen

auftreten. Dann wird die Sonde mit der Anode verbunden und, nachdem der Bogen eingebrannt ist, die Sonde in den Bogen gebracht. Jetzt wird der Abstand der Sonde von der Anode und der Ausschlag des Voltmeters B notiert; und zwar werden möglichst gleichmässig — immer mit Einstellung der gleichen Stromstärke — alle 3 Formen untersucht, damit die Temperatur im Kessel und der Sauerstoffgehalt gleich sind. Nun wird durch Umwerfen der Wippe die Kathode mit der Sonde verbunden und ebenfalls für alle 3 Formen in möglichst vielen Entfernungen der Sonde von der Kathode die zugehörige Spannung aufgeschrieben. Die erhaltenen Resultate werden so graphisch aufgezeichnet, dass die Blätter a immer den Fall des Potentials gegen die Anode, die Blätter b den Fall gegen die Kathode enthalten. Die Werte liegen fast immer annähernd auf einer Geraden. Durch Verlängerung derselben bis zum Schnitt mit der Entfernung 0 von der Elektrode erhält man den Wert des Anoden- oder Kathodenfalls. Zugleich gibt die Neigung der Geraden das Gefälle der Spannung im Bogen an.

Fehler der Methode.

Im Anschluss an das zuletzt Gesagte ist nun freilich zu bemerken, dass das Potentialgefälle in der Gassäule nicht genau konstant ist. Bei einer Reihe von Extrapolationen wurde dies berücksichtigt. Die Kurven sind dann aus geraden Stücken zusammengesetzt. Es zeigt sich auch eine gewisse Gesetzmässigkeit, besonders bei der sehr ruhigen Form 1.

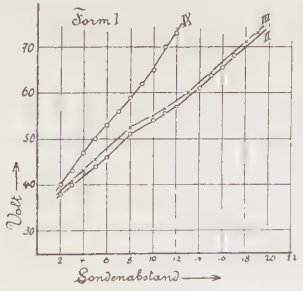

Fig. 6.

Es ist auf beiliegender Fig. (6) das Resultat der in den Blättern II, III und IX ausgeführten Messungen dargestellt, und hiebei zeigt sich in einiger Entfernung von der Kathode eine ziemlich regelmässige Abflachung der Kurve (vergl. auch die übrigen Messungen der Form 1). Dies lässt sich wohl mit der eigentümlichen Schichtung

in diesem Bogen erklären. Vielleicht hängt das aber auch damit zusammen, dass die Sonde im Glimmlicht in der Nähe der Anode wohl noch weissglühend, aber weniger heiss wird als im eigentlichen Metalldampf; sie sendet daher weniger negative Ionen aus und der Spannungsunterschied wird gegenüber den übrigen Teilen des Bogens relativ grösser. Es hat dies zur Folge, dass der Unterschied zwischen dem Anodenfall der Form 1 und dem der heisseren Formen 2 und 3 um etwa 2 bis 3 Volt zu vermindern wäre. Auch die andern Formen zeigen Abweichungen von der Geraden.

Auf den Umstand, dass die Kurven nicht, wie angenommen wurde, Gerade sind, ist es wohl zurückzuführen, dass die Zahlen für das Spannungsgefälle auf den Kurven a und b nicht unbedeutende Unterschiede aufweisen. Dies fällt aber nicht wesentlich ins Gewicht, da die in der Nähe der Elektrode liegenden Punkte besonders berücksichtigt sind.

Fig. 7.

Auf eine Reihe von Fehlern, die in der Anwendung der Sonde liegen, ist schon hingewiesen worden. Es ist klar, dass durch die Kohlensonde fremde Stoffe in den Bogen gebracht werden, Ionen von Kohlenstoff, von in der Kohle okkludierten Gasen, die sich an der Elektrizitätsleitung gerade in der Umgebung der Sonde beteiligen. Die oben angeführten Kontrollversuche haben jedoch gezeigt, dass das Resultat dadurch jedenfalls nicht stark beeinflusst wird. Wesentlicher ist die Gestaltsänderung des Bogens durch Einführung der Sonde, weil sich der aufsteigende Gasstrom um die Sonde herum bewegen muss. Vorteilhaft ist dabei, dass die Sonde sich sehr schnell zuspitzt. Fig. 7 zeigt solche Sonden; die 2 oberen sind im Kupferbogen in Luft, die unterste in Stickstoff benützt worden. Das erleichtert natürlich auch die Bestimmung der Lage der Sonde im Bogen, bei unseren Angaben ihres Mittelpunktes. Es ist auch ersichtlich, dass bei grösseren Bogen der durch die räumliche Aus-

dehnung der Sonde bewirkte Fehler immer kleiner wird. Überhaupt hat sich im Lauf der Untersuchung herausgestellt, dass diese Messungen bei grossen Bogen genauer werden. Natürlich wird auch die lokale Temperatur des Bogens durch die Sonde herabgesetzt. Im Moment, in welchem die Sonde in den Bogen gebracht wird, weicht der Bogen wie ein elastisches Band aus, oder es bildet sich anfänglich um die Sonde ein dunkler Raum, der aber nach kurzer Zeit nicht mehr sichtbar ist. Auch andere sekundäre Störungen machen sich zuweilen bemerkbar. Der Einfluss der Sonde machte sich auch darin geltend, dass beim Einführen derselben in den Bogen die Formen in andere übergingen. Daraus erklärt es sich auch, dass viele Kurven nicht bis ganz nahe an die betreffende Elektrode bestimmt werden konnten. Entweder wurde dann der Ansatzpunkt des Bogens so unruhig, dass keine Ablesung gemacht werden konnte, oder die gewünschte Form schlug in eine andere um. Diese Fehler, die bei Sondenmessungen kaum zu vermeiden sind, machen im Verein mit der von *Child* beschriebenen Erscheinung die Gültigkeit der absoluten Werte der gefundenen Zahlen fast illusorisch. Allein sie eliminieren sich fast vollständig bei der Betrachtung der *relativen* Verhältnisse. Sie haben für alle Formen ähnliche Grösse und gleiche Richtung.

Schwierig war auch die Bestimmung der Bogenlänge, weil besonders der Kupferbogen die lästige Eigenschaft hat zu klettern: d. h., unter gewissen Verhältnissen wechselt seine Basis ihre Lage fortwährend, sie setzt sich auch an den Seiten der Elektrode an und verändert dadurch die Länge beträchtlich. Um diesem Übelstand abzuhelfen, wurde die beschriebene grosse Anode gewählt, und ausserdem bei einer Reihe von Versuchen die Kathode mit einer bis an das Ende der Elektrode gehenden Röhre aus Quarzglas (von der Deutschen Quarz-Gesellschaft, Beuel-Bonn) umgeben. Der Einfluss dieser Einrichtungen ist aus den Werten VII und VIII ersichtlich.

Noch auf eine Eigentümlichkeit möchte ich hinweisen, die durch Fig. 8 veranschaulicht wird. Ist die Sonde mit der Anode verbunden, so zeigt das Voltmeter in der Mitte des Bogens den höchsten Wert. Dieser Wert nimmt aber mit der Entfernung der Sonde von der Mittellinie nur sehr langsam ab. Ist aber umgekehrt die Sonde mit der Kathode verbunden, so nimmt der Wert des Potentials sehr rasch ab. Eine Erklärung dafür kann im *Child*schen Phänomen in ganz allgemeiner Weise gefunden werden. Im ersten Fall strahlt die Sonde im Kern, im Zustand der Weissglut einen Überschuss negativer Ionen aus. Es wird also der Strom im Voltmeter B geschwächt. In einer gewissen Entfernung von der Mittellinie ist die Sonde nur noch rotglühend und verstärkt durch Ausstrahlung positiver Ionen den Strom. Ist die Sonde mit der Kathode verbunden, so kehren sich die Ver-

hältnisse um. Im Kern wird der Strom verstärkt, in einiger Entfernung dagegen geschwächt, was diesen raschen Abfall der Kurve hervorbringt.

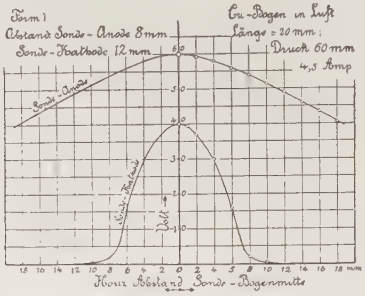

Fig. 8.

Um noch ein ungefähres Bild von der Grösse des Fehlers der absoluten Werte der Zahlen zu erhalten, ist auch die Elektrodenspannung e, nach der Angabe des Voltmeters C, den Tabellen beigefügt. Diese Grösse setzt sich zusammen aus dem Anodenfall a, dem Kathodenfall k und dem Gefälle im Bogen $b \cdot l$, wo l die Länge des Bogens in mm und b das Gefälle pro mm bedeuten. Es ist

$$e = a + k + bl.$$

Nehmen wir beispielsweise Tabelle II a, so erhält man daraus graphisch a und $b \cdot l$; $a + bl$ kann direkt in der Entfernung 20 mm (wo die Kathode sich befindet) abgelesen werden. Addiert man dazu den aus II b zu entnehmenden Wert k, so erhält man

$$e_1 = a + bl + k + s_1,$$

wo s_1 den Fehler der Messung darstellt. Daraus

$$e_1 - e = s_1.$$

Ebenso findet man e_2 aus $k + bl$, das aus II b erhältlich ist, und a. Der Fehler s_2 ist dann gegeben aus

$$e_2 - e = s_2.$$

Aus der folgenden Zusammenstellung der Werte s_1 und s_2 sieht man, dass die Werte positiv und negativ sein können. s_2 ist immer kleiner als s_1. Bei Form 1 ist s_1 positiv und s_2 negativ. Bei 3 wiegen die positiven Werte vor und sind grösser als bei 1. Bei 2 sind die Werte ungleich und eher positiv.

Aus den Kurven ist leicht zu sehen, dass diese Werte durch die Annahme der Geraden für das Gefälle stark beeinflusst werden. Auch konnten die Kurven häufig nicht durch den ganzen Bogen verfolgt werden. Deshalb sind zum Teil diese Werte sehr gross, zum Teil auch gar nicht berechnet worden.

Formen	1	1a	2	2a	3	3a	3b
Cu-Bogen in Luft	II s_1 +0,6		+2,0		+5,8		
	s_2 −1,7		−2,0		+2,9		
	III s_1 +3,1		+5,5		+4,3		
	s_2 −2,4		+0,3		+1,5		
	IX s_1 +1	+3,4			VII +0,5	−0,9	
	s_2 −8	+3			−2,0	−2,0	
					VIII +2,6	−0,5	
					+2,0	0	
Cu-Bogen in Stickstoff	A s_1 +0,7		+6,0		+3,0		
	s_2 −4,3		−3 4		−0,8		
	B s_1 −0,1	—			D s_1 +0,5	+0,4	
	s_2 −0,8	—			s_2 −3,0	—	
Fe-Bogen in Luft	A s_1 +5,5	+3,0			E +1,6	+1,5	+5,1
	s_2 −1,5	—			+1.0	−3.3	−3,5
	B s_1 +4	+2					
	s_2 −1.6	−1,6					
		+3,1		+9,5		+7,1	
		D −4		−1,4		+0,8	

Kupferbogen in Luft.

Von den ausgeführten Messungen seien hier fünf angegeben, aus denen die Hauptresultate deutlich zu ersehen sind. Nicht messbar waren die Formen 2 a und 3b. Sie zeigen sich nur selten und dann nur ganz momentan, so dass das Voltmeter sich nicht einstellen konnte. Auf zwei Umstände sei hier aufmerksam gemacht, die oben schon

angedeutet sind. Der ganze Apparat erwärmt sich bei längerem Brennen. Darauf wurde Rücksicht genommen, indem die Messungen nicht lange fortgesetzt wurden und die zu vergleichenden Formen abwechselnd gemessen wurden, wodurch sich beim Vergleich der Unterschied der Temperatur aufhebt. Zweitens wird die Luft immer ärmer an Sauerstoff. Diesem Übelstand wurde dadurch möglichst abgeholfen, dass durch die Kapillare an g (Fig. 1) und entsprechende Hahnstellung an der Zuleitung zur Luftpumpe ein schwacher Luftstrom durch das Rohr geschickt wurde.

Die Resultate sind nun folgende: Die Kurven II und III zeigen Unterschiede im Anodenfall, und zwar zwischen 1 und 2 von etwa 8 Volt, zwischen 2 und 3 von ungefähr 6 Volt. Der Kathodenfall hat für alle drei Formen dieselbe Grösse. Der kleine Unterschied in II bei Form 3 und in III bei den drei Formen tritt unregelmässig, einmal bei diesem, dann bei jenem Bogen auf, ist also wohl a ıf Messungsfehler zurückzuführen. Die Messungen VII und VIII beziehen sich auf 3 und 3 a. Sie unterscheiden sich von einander nur in den Elektroden: bei VIII ist eine grosse Anode und eine Kathode mit Quarzrohr verwendet worden, wodurch die Messung infolge der Ruhe des Bogens und der Konstanz der Bogenlänge sich günstiger gestaltet. Beide Resultate ergeben an der Anode keine wesentliche Differenz; an der Kathode, wo der Bogen an Kupfer-Oxyd brennt, beträgt der Unterschied $2^1/_2$ Volt. Infolge der grössern Leitfähigkeit des Bogens, bedingt durch den grösseren Gehalt an Oxyd, wird auch das Gefälle im Bogen erniedrigt. Man sieht auch, wie weit die Wirkung in den Bogen reicht, nämlich bis etwa 17 mm von der Kathode weg bei VIII[30]) und bis ganz nahe an die Anode bei VII. Bei kürzeren Bogen wird sogar der Anodenfall bei 3 a gegenüber 3 kleiner. Doch ist diese Wirkung, wie aus dem Vergleich mit dem angegebenen Resultat hervorgeht, wohl sekundärer Natur. Ein analoges Resultat erhält man aus IX, wo die Glimmbogen Kupfer-Kupfer und Kupfer-Kupferoxyd verglichen werden. Der Anodenfall ist in beiden Fällen gleich. Der Unterschied im Kathodenfall (7 Volt) ist wohl, auch im Vergleich mit den analogen Messungen im Stickstoff und im Eisenbogen, gross; Messungen unter nur wenig veränderten Verhältnissen für die gleichen Formen ergaben indessen ähnliche Resultate.

---

[30]) Bei den Messungen VIII hatte Herr Dr. Zickendrath die Güte, für Form 3a die Ablesungen am Voltmeter B zu machen, während ich Form und Länge beobachtete. Es geschah dies, um nicht durch Voreingenommenheit meinerseits die Resultate zu beeinflussen. Ich möchte es nicht unterlassen, Herrn Dr. Zickendraht für die Freundlichkeit, womit er mir stets zu helfen bereit war, bestens zu danken.

In den folgenden Tabellen sind die erhaltenen Zahlen zu jeder Form in horizontalen Reihen angeordnet. I stellt in Tabellen und Kurven die Stromstärke, p den Druck in mm Hg und l die Bogenlänge dar; mit d_k und d_a sind die Durchmesser der Kathode und Anode bezeichnet. b_1 das Potentialgefälle pro mm im Bogen, a der Anodenfall, k der Kathodenfall und e die gemessene Gesamtspannung zwischen den Elektroden sind so (in Volt) angegeben, dass die zwei oder drei Zahlen in der gleichen Reihenfolge zu den verschiedenen Formen gehören, wie sie vor der Tabelle der Messungen stehen. Wo b im Bogen andere Werte annimmt, sind diese in Klammern beigefügt.

Tabellen.

mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

II J = 5 Amp.; p = 110 mm; l = 20 mm; d_k = 10 mm; d_a = 47,2 mm

a)

Formen																									
1	—	38	40	—	44	46,5	—	51	—	54	55,5	57	—	61	64	—	68	—	—	—					
2	—	29,5	—	34	36,5	—	—	42	—	47,5	—	50	—	—	57	—	61	—	—	—					
3	—	—	26	—	30	—	33,5	36	—	40	—	43,5	—	—	49,5	—	53	—	—	—					

b = 1,96; 2,05; 1,95 a = 34,3; 25,98; 20,15 e = 86; 78; 67

b)

1	15	17	19	—	24	—	27,5	—	30	31,5	—	34	—	38,5	40	42	43,5	—	—	—					
2	—	16,5	—	—	21,5	—	—	28	30	31	—	35	—	—	41	—	45	—	—	—					
3	—	16	18,5	—	23,5	—	—	28,5	—	32,5	—	—	38	—	42	—	—	—	—	—					

b = 1,84; 1,84; 1,84 k = 13,0; 13,0; 13,7

III J = 5 Amp.; p = 110 mm; l = 25 mm. Elektroden wie II

a)

1	—	—	41	43	45,5	—	—	52,5	—	55	56,5	—	60	—	64	67	—	71	73,5	—	—	—	—	—	—
2	—	31	—	35,5	—	39	—	—	44	47	49	—	—	—	56	—	—	62		67	—	—	—		—
3	—	22	24	—	29	—	—	34,5	36	38	—	40,5	—	45	47	—	51	—	—	57	—	—	—	—	—

b = 1,95; 1,93; 1,83 a = 35,6; 27,3; 19,5 e = 93; 82; 73

b)

1	13,5	16,5	19	21	23,5	26	28	—	33,5	35	—	38	—	—	42	—	—	47	—	51					
2	—	16	—	20,5	23	—	27	—	—	33,5	—	37	—	42	44	—	—	—	53	—					
3	—	16	18,5	20	22,5	—	27	29	—	—	—	37	—	—	44	—	—	52	—	—					

Die tiefer. Werte von 1 wohl infolge der tiefer. Temp. d. Sonde.

b = 2,12; 2,12; 2,12 k = 12,0; 12,2; 12,1

mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

VII J = 5 Amp.; p = 200 mm; l = 25 mm; $d_k = d_a = 10$ mm

a)

3	—	20	—	24	26	28	—	32	33	35	36	38	40	43	45	—	—	49	—	53	55	58	60	—	—
3a	—	20	—	22	23	25	—	26	—	30	32	—	—	36	38	40	—	44	45	—	47	—	—	—	—

b = 1,80; 1,41 a = 17,3; 17,0 e = 76; 65

b)

3	15	18	20	—	—	23	25	26	27	30	—	34	37	39	40	42	44	—	48	49	Bogen unruhig				
3a	—	—	16	—	—	20	22	—	24	25	26	28	30	—	32	—	35	—	—	42	siehe VIII				

b = 1,71; 1,38 k = 14,0; 11,6

VIII J = 5 Amp.; p = 200 mm; l = 25 mm; $d_k = 10$ mm; $d_a = 47{,}3$ mm
Kathode mit Quarzröhre

a)

3	—	—	27	30	32	34	36	38	40	43	44	46	47	—	49	50	53	55	56	—	62	63	65	67	—
3a	—	—	—	29,5	32	33,5	35	38	39	41	41,5	42	44	45	46	47	48	49	50	51	—	—	—	—	—

b = 2,18 [1,84]; 2,18 [1,84; 1,14] a = 21,2; 21,2 e = 81; 70

b)

3	16	18	20	22	24	25	27	29	31	34	35	36	37,5	39	41	42	—	46	48	50	52	55	56	—	—
3a	—	15	16	18	20	22	24	25	26	27	28	30	32	34	35	35,5	—	38	39	40	42	45	47	—	—

b = 1,81; 1,46 k = 14,9; 12,5

IX J = 5 Amp.; p = 40 mm; l = 20 mm. Elektroden wie VIII.

a)

1	—	40	43	47	50	53	56	59	62	65	70	74	—	—	—	—	—	—	—	—					
1a	—	38	40	42	45	—	—	50	—	54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					

b = 3,17; 2,14 [1,9] a = 34,0; 34,0 e = 96; 77

b)

1	—	19	21,5	23,5	25	—	29	31	33	35	36,5	38,5	—	42	—	—	—	—	—	—					
1a	—	11	14	16	18	—	—	22	—	30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					

b = 1,93; 1,87 k = 15,3; 8,4

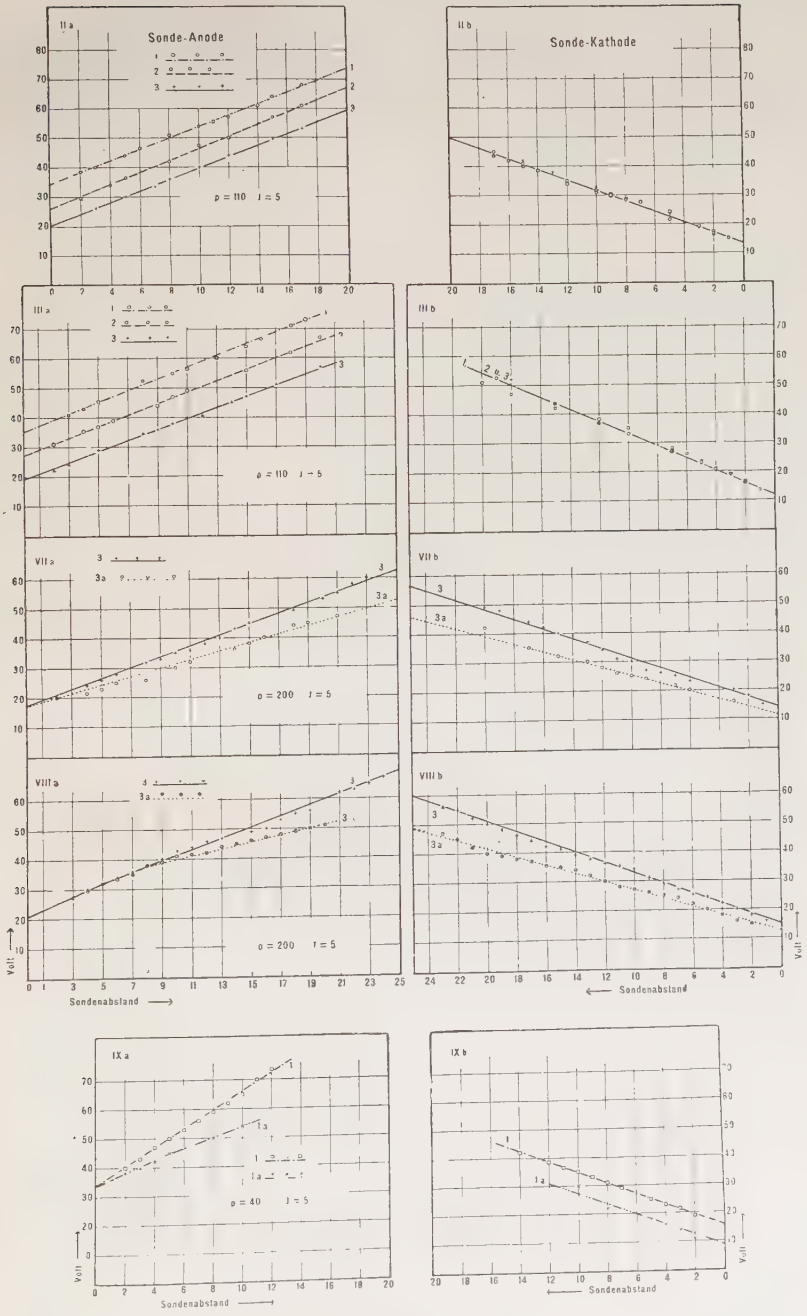
II a
Sonde-Anode
p = 110 J = 5
II b
Sonde-Kathode
III a
p = 110 J = 5
III b
VII a
p = 200 J = 5
VII b
VIII a
p = 200 J = 5
VIII b
Volt
Sondenabstand
IX a
p = 40 J = 5
IX b
Volt
Sondenabstand

Fig. 9.

Zusammenstellung der Anoden- und Kathodenfälle.

Formen		1	1a	2	2a	3	3a
II p = 110 mm Hg; l = 20 Anodendurchm. 47.2	a	34,3		26,0		20,1	
	k	13,0		13,0		13,7	
III p = 110 mm; l = 25 wie II	a	35,6		27,3		19,5	
	k	12,0		12 2		12,1	
VII p = 200 mm; l = 25 Anode 10 mm	a					17,3	17,0
	k					14 0	11,6
VIII p = 200 mm; l = 25 Anode 47,3 mm Kathode mit Quarzr.	a					21,2	21,2
	k					14,9	12,5
IX 40 mm; l = 25 wie VIII	a	34,0	34 0				
	k	15,3	8,4				

Kupferbogen in Stickstoff.

Die Formen 2 und 2 a, die in Luft sehr unruhig sind und schwer oder gar nicht messbar waren, treten im Stickstoff viel besser auf. Deshalb wurden Versuche mit dem Kupferbogen im Stickstoff unternommen. Der Stickstoff stammte aus einer Bombe von Kahlbaum-Berlin und wurde, um getrocknet zu werden, durch eine Trockenflasche mit Phosphorpentoxyd geleitet. Zur Vermeidung eines Überdrucks in der Zuleitung wurde noch ein Quecksilbermanometer an dieselbe angebracht. Die Versuche wurden immer erst nach dreimaliger Füllung und Entleerung der Röhre begonnen.

Mit reinen, frisch abgedrehten Elektroden erhält man nun 1, 2 und 3 sehr leicht, während die Zischformen nicht auftreten. Besonders schön und ruhig brennt 2. Nur hat diese Form den Nachteil, dass sie der Sonde stark ausweicht. Überhaupt wirkt die Sonde bei diesen Bogen stärker auf die elektrischen Verhältnisse ein. Die Stromstärke sinkt um etwa $^1/_4$ Ampère bei allen Formen, während die Spannung um 8—10 Volt steigt. Die angegebenen Zahlen sind natürlich immer (so auch bei den anderen Messungen) mit Sonde im Bogen zu verstehen. Um die Zischformen zu erhalten, muss man die Elektroden kurze Zeit in Luft brennen. Form 2 a, die auch hier die meisten Schwierigkeiten bietet, konnte unter den angegebenen Verhältnissen dadurch für einen, der Messung zugänglichen Zeitraum gewonnen

werden, dass eine ganz reine Anode und eine oxydierte Kathode ohne Quarzröhre angewendet wurde.

Die Resultate waren qualitativ dieselben wie in Luft. Die Formen 1, 2 und 3 unterscheiden sich im Anodenfall um 18,5 und 10,4 Volt ($\mathfrak{A}_a$), nicht im Kathodenfall. Die Zischformen haben, und dies gilt auch für 2a, denselben Anodenfall wie ihre entsprechenden oxydfreien Formen, während der Kathodenfall um 3 bis $3^1/_2$ Volt tiefer liegt.

Wir können einen allgemeinen Vergleich mit den in Luft gewonnenen Resultaten anstellen (ohne Zahlenangaben, weil die Bedingungen andere sind als in Luft). Der Kathodenfall wurde durchwegs etwas kleiner gefunden, während der Anodenfall bei 1 und 2 höher liegt. Es mag das damit zusammenhängen, dass gerade bei 1 und 2 das umgebende Gas an der Anode (also Luft oder reiner Stickstoff) die Leitung der Elektrizität bestimmt.

Wie zu erwarten ist, wird das Gefälle im Stickstoff grösser als in der Luft. Während die Werte von b für den Kupferbogen in Luft sich um den Wert 2 bewegen (mit Ausnahme von IX), sind sie in Stickstoff durchwegs grösser als 2 Volt/mm (mit Ausnahme von $\mathfrak{C}_b$, wo aber nur sehr wenig Punkte gefunden werden konnten). Der Unterschied in der Elektrodenspannung der Bogen in Luft und Stickstoff rührt also im wesentlichen vom Unterschied des Gefälles in der Gassäule her.

Für die folgenden Tabellen und Kurven gilt dasselbe wie für den Bogen in Luft.

Tabellen.

mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\mathfrak{A}$	J = 5 Amp ; p = 200 mm; l = 20 mm; d_k = 9,2; d_a = 47,1 mm Kathode mit Quarzröhre.																		
a)																			
1	—	53	56	—	60	—	66	—	69	72	74	—	—	—	—	—	—	—	—
2	32	36	—	42	45	—	49,5	—	—	56	—	60	—	64	65	—	—	—	—
3	—	—	28	—	31	33	—	—	40	42,5	—	46	—	51	53	56	—	—	—
	b = 2,25; 2,47; 2,19							a = 49,2; 30,7; 20,3				e = 105; 85; 72							
b)																			
1	13,5	16	18		21,5		25			31									
2	13		17		22	23		26		30									
3	13,5	15		19	21		24	26											
	b = 2,00; 2,00; 2,00							k = 11,5; 10,9; 10,9											

mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

𝔅 J = 5 Amp.; p = 80 mm; l = 20 mm; d_k u. d_a wie 𝔄

a)

1	40	43	45,5	48	51,5	—	55	57	—	61,5	64	—	68	—	70,5	73	—	—	—
1a	41	—	45	48	50	53	—	56	57	59	60	—	64	—	67	-		-	—

b = 2,26; 2,26 [1,57] a = 38,8; 38,8 e = 96; 84

b)

1	14	15,5	17	19	20	21,5	24	25,5	27,5	29	—	32	—	36	39	—	—	—	—
1a	—	12	13	15	—	—	19	—	—	25	26	—	—	—	—	—	—	—	

b = 1,69; 1,59 k = 11,9; 8.6

𝔈 J = 2,5; p = 200 mm; l = 20 mm; d_k = 9,2; d_a = 47,1 mm; ohne Quarzröhre.

a)

2	—	50	—	56	59	62	65	68	—	74	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2a	—	—	53	—	—	58	—	62	—	67	—	—	—	-	-	—			—

b = 3,0; 2 25 a = 44,0; 44,0 e = 122; 109

b)

2	14	16	18	—	22,5	25	28	32	—	—	40,5	—	45	-		-		—	—
2a	11	—	15	—	19	—	22	—	—	—	—	—	-	-			-		—

b = 2,16; 1,93 k = 11,7; 8,9

𝔇 J = 5 Amp.; p = 600 mm; l = 20 mm; d_k u. d_a wie 𝔈
Kathode mit Quarzröhre.

a)

3	—	—	25	29	—	34	35	—	40	43	—	46	—	50	52	—	—	60	63
3a			25	—	30	—	—	34	35	—	—	39,5	—	42	—	—	50	—	53,5

b = 2,29; 2,29 [1,53] a = 19,0; 19,0 e = 75; 60

b)

3	—	15	17	—	22,5	—	26	—	29,5	32	—	36	38	—	41			—	—
3a	9	11	14	—	18	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

b = 2,1; 2,01 k = 10,8; 7,4

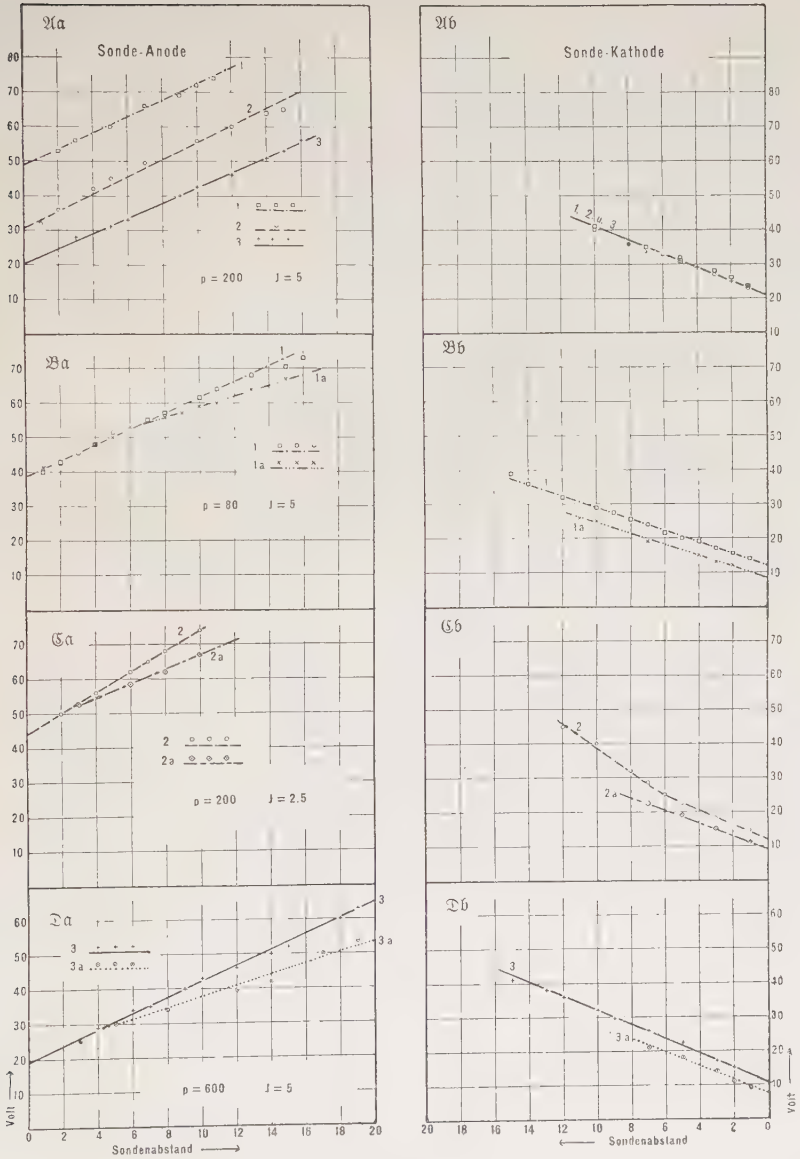
Aa
Sonde-Anode
p = 200 J = 5
Ab
Sonde-Kathode
Ba
p = 80 J = 5
Bb
Ca
p = 200 J = 2.5
Cb
Da
p = 600 J = 5
Db
Volt
Sondenabstand

Fig. 10.

Zusammenstellung der Anoden- und Kathodenfälle.

Formen		1	1a	2	2a	3	3a
𝔄 5 Amp.; 200 mm; l = 20 Anode 47,1 mm Kathode 9,2 mm; Quarzrohr	a	49,2		30,7		20,3	
	k	11,5		10,9		10,9	
𝔅 5 Amp.; 80 mm; l = 20 wie 𝔄	a	38,8	38,8				
	k	11,9	8,6				
ℭ 2,5 Amp.; 600 mm; l = 20 wie 𝔄, aber ohne Quarzrohr	a			44.0	44,0		
	k			11.7	8,9		
𝔇 5 Amp.; 600 mm; l = 20 wie 𝔄, m. Quarzrohr	a					19,0	19,0
	k					10,8	7,4

Eisenbogen in Luft.

Der Eisenbogen ist den Messungen bei niederen Drucken ziemlich gut zugänglich; bei höheren wird auch er unruhig (E). Die Kurven weichen noch stärker von der Geraden ab als beim Kupferbogen.

Das Oxyd spielt im Eisenbogen eine wichtige Rolle (vgl. *Arons* l. c.). Die häufigsten Formen sind die Zischformen, also die Bogen zwischen Eisen (Anode) und Eisenoxyd (Kathode). Auch der Bogen zwischen Eisenoxyd (Anode und Kathode) konnte gemessen werden (Form 3b in E). Form 2 dagegen konnte nicht gemessen werden. Die relativen Verhältnisse sind im Eisenbogen analog wie im Kupferbogen. 1a, 2a und 3a haben an der Anode Differenzen von 9 und 4 Volt, 1 und 1a an der Kathode eine solche von 2 bis $2^1/_2$ Volt. Die Messung E gibt folgendes Resultat: 3 (Eisen-Eisen) und 3a (Eisen-Eisenoxyd) differieren nur an der Kathode ($5^1/_2$ Volt); 3 und 3b an beiden Elektroden (Anode 7 Volt; Kathode $5^1/_2$ Volt); 3a und 3b (Eisenoxyd-Eisenoxyd) unterscheiden sich nur im Anodenfall (7 Volt). Allerdings ist bei diesen Verhältnissen der Bogen sehr unruhig; doch trat das wesentliche, die tieferen Werte für 3b, deutlich hervor. Der grosse positive Wert von s_1 (+5,1) würde ausserdem noch auf eine Verkleinerung von a weisen.

Ein Vergleich dieser Zahlen mit den entsprechenden Werten des Kupferbogens ist nicht leicht möglich, da die Verhältnisse, unter denen die beiden Messungsreihen angestellt wurden, doch zu sehr von einander verschieden sind. Ein allgemeiner Überblick zeigt, dass Anoden- und Kathodenfall benachbarte Werte besitzen.

In den folgenden Tabellen fehlt die nicht erhältliche Form 2. Die Elektroden hatten bei allen Messungen 10 mm Durchmesser. Die Quarzröhre ist nicht benützt worden.

Tabellen.

mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A								J = 3 Amp.; p = 40 mm; l = 15 mm											
a) 1	37	41	44	47	51	55		62	66	69	—								
1a	38	40	43	46	50	—	56	58	61	64	67	70	—	—	—				
	b = 3,48; 3,20 [2,82] a = 34,0; 33,8 e = 90; 82																		
b) 1	—	15	18	22	25	28	31			40	42	44			—				
1a	—	12	15	18	21	24	26	28	30	32									
	b = 3,02; 2,58 k = 9,3; 7,0																		
B								J = 4 Amp.; p = 40 mm; l = 20 mm											
a) 1	—	—	43	46	50	53	56	59	62	65	68	72					—		
1a	37	—	43	47	50	—	56		58	62	65	67				—			
	b = 3,12; 3,12 [2,5] a = 34 1; 34,1 e = 102; 93																		
b) 1	12,5	15	18	—	24	27	29	32	35	38	41	44	—	—	—	—	—	—	—
1a	—	13	15	17,5	20	23,5	26	29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	b = 2,81; 2,65 k = 9,9; 7,2																		
D								J = 4 Amp.; p = 200 mm; l = 20 mm											
a) 1a				—	48	51	53	55	57	59	61	64		67					
2a	30	32	35,5	37	40	43	45	47	49	51	—	55	57	60	—	—	—	—	—
3a	26	—	30	—	35	—	—	40	—	45	—	48	—	53	55	—	—	—	

1 a springt in 2 a um bei Abstand < 5 mm. b = 2,55 u. a = 36 deshalb nicht sehr genau.

b = 2,55 [2,10]; 2,55 [2,08]; 2,08 a = 36; 27,4; 23,8 e = 90; 78; 72

mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
b)																			
1a	—	17	19	—	22	—	25	27,5	29	31	34	—	38	39,5	41	—	—	—	—
2a	17	20	21,5	23	24	26	27,5	—	29	32	34	35,5	—	40					
3a	—	—	19	20	22	23	25	—	—	31	—	36	—	—					

b = 1,82; 1,69; 1,82 k = 13,1; 15,5; 13,1

E J = 4 Amp.; p = 400 mm; l = 20 mm

a)																			
3	—	—	—	—	33	35	—	39	41,5	45	—	—	49	—	53	—	—	61	
3a	—	—	28	30	—	—	36	—	41	44	—	47,5	—	49	52	—	56	58	—
3b	—	—	—	23	25	—	—	31	—	35	—	—	—	42	—	—	—	—	—

b = 2,02; 2,02; 1,86 a = 22,5; 22,5; 15,3 e = 80; 75; 68

b)																			
3		23		27	29		32			40									
3a		17	19	21	23	26	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45			–
3b				21	23			29		33	35	37		40	41		43	—	–

b 1,95; 1,75; 1,75 k 19,5; 13,9; 13,9

Zusammenstellung der Anoden- und Kathodengefälle.

Formen		1	1a	2a	3	3a	3b
A 3 Amp.; 40 mm; l = 15 mm	a	34,0	33,8				
	k	9,3	7 0				
B 4 Amp.; 40 mm; l = 20	a	34,15	34,15				
	k	9,9	7,2				
D 4 Amp.; 200 mm; l = 20	a		36,0	27,4		23,65	
	k		13,1	15,5		13,1	
E 4 Amp.; 400 mm: l = 20	a				22,5	22,5	15,3
	k				19,5	13,9	13,9

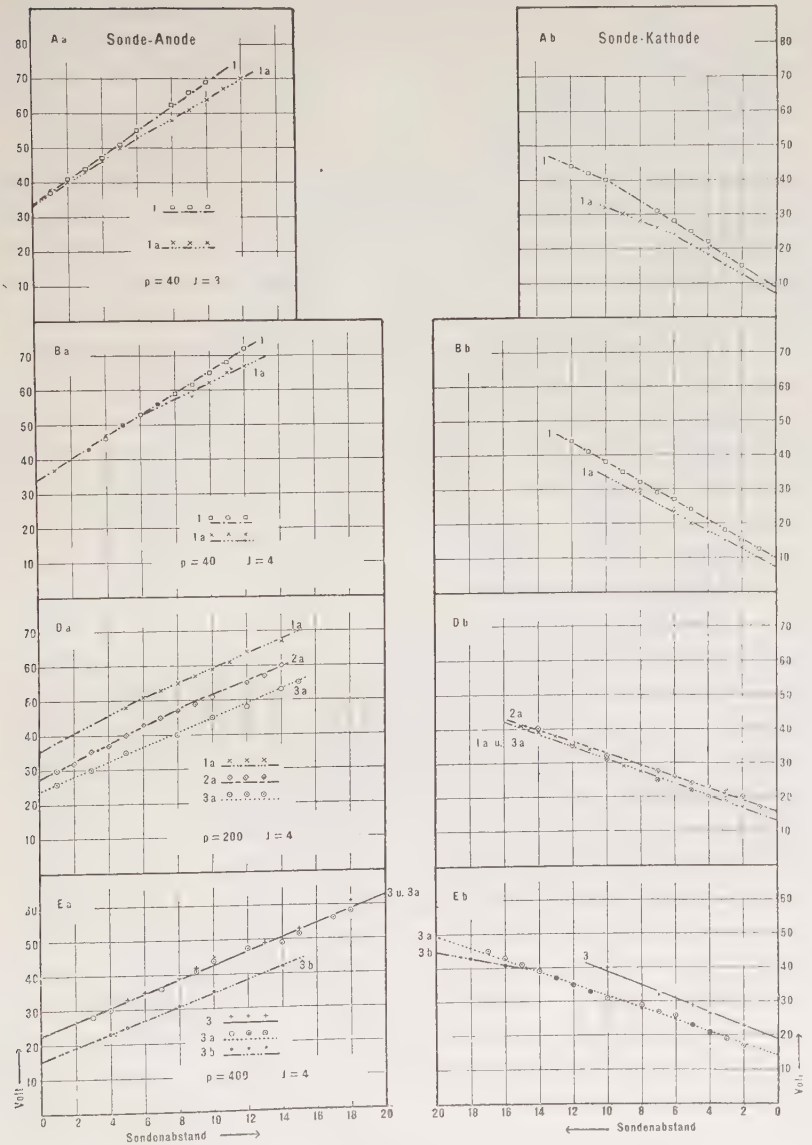
Aa Sonde-Anode
Ab Sonde-Kathode
Ba
Bb
Ca
Cb
Da
Db
Ea
Eb
p = 40 J = 3
p = 40 J = 4
p = 200 J = 4
p = 409 J = 4
Volt
Sondenabstand

Fig. 11.

Ergänzungen.

Es lassen sich aus den gewonnenen Tabellen noch einige Resultate erhalten, die freilich nicht systematisch untersucht worden sind, und nur angeführt werden zur etwaigen Kontrolle an den Resultaten anderer Autoren. Zunächst zeigt ein Vergleich mit den von Child erhaltenen Zahlen die gleiche Grössenordnung der von mir gemessenen Werte.

Die Abhängigkeit von Anodenfall und Kathodenfall von den verschiedenen Faktoren, die ihre Grösse beeinflussen, zeigt sich in folgenden Punkten:

1. Bogenlänge: II und III zeigen bei den Formen 1 und 2 ein Wachsen des Anodenfalls mit wachsender Bogenlänge; dass die Abnahme bei 3 wohl auf einen Messungsfehler zurückzuführen ist, zeigten Messungen mit kleineren Bogenlängen. Der Kathodenfall ändert sich nur wenig. (Vgl. Mrs. *Ayrton* l. c. pg. 214.)
2. Stromstärke: Aus dem vorhandenen Beobachtungsmaterial ist darüber kein Schluss möglich.
3. Druck: Anoden- und Kathodenfall werden, wie auch das Gefälle im Bogen, vom Druck des umgebenden Gases beeinflusst, aber nicht gleichmässig. In B und D (Form 1a des Eisenbogens) wachsen beide Grössen mit wachsendem Druck, während das Gefälle b und das Gesamtpotential e abnehmen; D und E zeigen für 3a Abnahme des Anodenfalls und Zunahme des Kathodenfalles, $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ (Cu-bogen in Stickstoff) Zunahme des Anodenfalls für 1, $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{D}$ für 3 eine kleine, allerdings nicht sichere Abnahme desselben bei gleichzeitiger Zunahme des Gesamtpotentials. Nun haben schon *Duncan, Rowland* und *Todd*[31]) für den Kohlebogen, *Arons*[32]) für verschiedene Elektroden (für sehr kleine Bogenlängen), besonders aber *Hagenbach* und *Veillon*[33]) für den Kupferbogen und *Fabry* und *Buisson*[34]) für den Eisenbogen die Abhängigkeit der Elektrodenspannung vom Druck untersucht. Diese Forscher haben komplizierte Volt-Druck-Kurven aufgestellt mit Extremwerten, die auch bei den verschiedenen Formen bei verschiedenen Drucken liegen. Da nun die Elektrodenspannung eine Funktion von Anoden- und Kathodenfall und vom Gefälle b ist, so sind unsere unregelmässigen Schwankungen nicht weiter verwunderlich.

[31]) *L. Duncan, J. Rowland* und *R. J. Todd.* E. T. Z. 14, 1893. S. 603.
[32]) l. c.
[33]) l. c. S. 87.
[34]) l. c.

4. Elektroden: VII und VIII geben Aufschluss über die Wirkung der benützten Elektroden. Die Einführung der grossen Anode hat demnach eine Vergrösserung des Anodenfalls um etwa 4 Volt zur Folge. Während nun *G. Schulze*[35]) eine Zunahme des Anodenfalls bei gekühlten Elektroden findet, erhalten *Stark, Retschinsky* und *Schaposchnikoff*,[36]) ebenso *Stark* und *Cassuto*[37]) das entgegengesetzte Resultat, das der anfangs skizzierten Theorie entspricht. Da die Kupferelektrode auf einem schlechterleitenden Eisenstab aufgeschraubt war, können unsere Zahlen für diese Frage nicht in Betracht fallen. Die Quarzröhre um die Kathode steigert den Kathodenfall um 0,9 Volt bei 3 und 3a. Auch hier spielen wohl eine Reihe von Umständen eine Rolle, die nicht einfach zu übersehen sind; berücksichtigt man nur das Verhindern der Wärmestrahlung aus der Kathode, so müsste nach *Simon*[38]) der Kathodenfall kleiner werden.

Es sei besonders betont, dass die zuletzt angeführten Punkte nicht als definitive Resultate zu betrachten sind. Die Messungen sind nach diesen Richtungen hin zu unsystematisch und zu wenig zahlreich ausgeführt.

Zusammenfassung

Die erhaltenen Resultate lassen sich in Kürze wie folgt zusammenfassen:

Es wurden die sieben von *Hagenbach* und *Veillon* gefundenen Formen des Kupfer- und Eisenbogens in Beziehung auf Kathoden- und Anodenfall untersucht und es ist dabei folgendes festgestellt worden:

Die normale Bogenform, der Glimmbogen und die Zwischenform 2 unterscheiden sich im Anodenfall, nicht im Kathodenfall. Von diesen drei Bogen existieren die Zischformen, die durch Oxydation der Kathode entstehen und deshalb auch einen kleineren Wert des Kathodenfalls aufweisen als die gewöhnlichen Formen, während der Anodenfall gleich ist. Die Form 3 zeigt noch eine weitere Modifikation, die zwischen den Metalloxyden an Anode und Kathode brennt und deshalb auch kleineren Anoden- und Kathodenfall hat als der normale Bogen.

Zum Schluss sei mir noch erlaubt, meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor *August Hagenbach*, den herzlichsten Dank auszusprechen. Er hat meiner Arbeit stets lebhaftes Interesse entgegengebracht und sie mit wertvollen Ratschlägen gefördert.

[35]) *G. Schulze.* Ann. d. Phys. 12, 1903. S. 828.

[36]) *J. Stark, T. Retschinsky* und *A. Schaposchnikoff.* Ann. d. Phys. 18, 1905. S. 213.

[37]) *J. Stark* und *L. Cassuto.* Phys. Ztschr. 5, 1904. S. 264.

[38]) *H. Th. Simon.* Phys. Ztschr. 6, 1905. S. 297.

Vita.

Ich, Edmond-Charles Banderet aus Frésens (Neuchâtel), wurde geboren am 28. September 1884 in Porrentruy (Bern) als Sohn des Paul Banderet, Lehrer und dessen Ehefrau Elise geb. Sydler. Mein Vater war vom Herbst 1891 an als Professor in Stuttgart; dort besuchte ich die Elementarschule von 1891 bis 93, dann das humanistische Eberhard-Ludwigs-Gymnasium, das ich im Herbst 1903 nach bestandener Reifeprüfung verliess. Bis Herbst 1905 war ich an der technischen Hochschule in Stuttgart immatrikuliert und setzte dann meine Studien an der Universität Bern fort. Im Mai 1908 bestand ich dort das Examen für das höhere Lehramt. Vom Herbst 1908 an habe ich mich an der hiesigen Universität dem Studium der Physik gewidmet. Seit Herbst 1908 bin ich als Lehrer der Mathematik, Naturkunde und Geographie an der Freien evangelischen Volksschule Basel angestellt.

Während meiner Studienzeit besuchte ich die Vorlesungen und Praktika folgender Dozenten:

Stuttgart: K. Reuschle (†), R. Mehmke, H. Roth, A. Stübler, Koch, Hell, A. Sauer, Wölfling.

Bern: P. Gruner, G. Huber, A. Baltzer, P. Kissling, Hugi, Haag, A. Forster, J. H. Graf, L. Crelier, J. Pexider, Kostanecki (†), Benteli.

Basel: A. Hagenbach, K. Vonder Mühll (†), R. Fueter, A. Buxtorf, G. Senn, H. Veillon, C. Schmidt, H. Zickendraht.

Allen diesen verehrten Lehrern meinen besten Dank.

Die vorliegende Arbeit ist unter Anleitung von Herrn Prof. August Hagenbach im physikalischen Institut der Universität Basel ausgeführt worden.